

# Fundamentos

- Conmutación de Circuitos vs Conmutación de Paquetes.
- Arquitectura de Redes: Modelo OSI-ISO y TCP/IP
- Los dominios del Tiempo y las Frecuencias
- Teoría de la Información.

Entre 1870 - 1970, las comunicaciones de teléfono se manejaban a través de Centrales de Conmutación de Circuitos, donde tenemos un arsenal de cables y pacheras, donde cada agujero representa a un usuario del teléfono de la ciudad. Cualquier par de extremos en una ciudad que querían hablar requerían la acción de un humano para conectar un cable, cerrando un circuito. A esto se lo conoce como paradigma de Conmutación de Circuitos, que tuvo una evolución de prácticamente un siglo.

Esto tuvo varios problemas. Podemos pensar que la velocidad, la necesidad de tener una persona conectando un circuito a mano, cuando esto escala a decenas de miles de conexiones, es tedioso, poco eficiente, y el mantenimiento de esos cableados era bastante problemático, muy sujeto a fallas. Si falla la central en algún aspecto, se quedaban sin comunicar gran parte de la población.

A partir de estos problemas de punto único de falla y de baja velocidad, se empezaron a estudiar otras posibilidades. Por ejemplo, la Conmutación de Paquetes fue algo que es considerado la idea semilla de Internet, que buscaba responder a estas limitaciones. Esta idea fue evolucionando desde 1958 hasta 1969, hasta que se obtuvo una red distribuida (ARPANET fue una de las primeras en implementar la suite TCP/IP). Uno de sus objetivos era hacer una red más tolerante a fallas, gracias a la multiplicidad de caminos entre dos puntos de la red. Si un camino se corta, es posible llegar al destino tomando otro camino. La estrategia es una red descentralizada, con múltiples caminos entre dos puntos, y la idea revolucionaria fue la idea de dividir los mensajes en distintos fragmentos que puedan seguir distintos caminos. La idea de seguir distintos caminos vino acompañada con la idea de la subdivisión de un mensaje en paquetes de red. Notemos el cambio conceptual de tener una señal eléctrica que está siendo cableada por una persona, que cierra un circuito entre dos usuarios en una ciudad, a decir que vamos a digitalizar y separar la información en paquetes que van a viajar como si fueran autos en autopistas.

En 1969, Kleinrock argumenta en “Models for Computer Networks” que la tecnología de las comunicaciones no podía ser definida cada vez, de manera particular, para cada aplicación. Debía ser una tecnología generalizable, de propósito general. De ahí surge esta idea de subdividir piezas de información en paquetes más chicos. Todas las tecnologías que se ubican en todas las capas de las arquitecturas de las redes, van a necesitar satisfacer requerimientos. Uno de esos requerimientos es la escalabilidad, solo con la escalabilidad se puede generalizar lo suficiente la tecnología como para que se tenga una única red global.

## Estructura del sistema telefónico

La PSTN (Public Switched Telephone Network) tiene como objetivo transmitir la voz humana en una forma más o menos reconocible (manejamos un cierto ancho de banda limitado). El sistema telefónico tradicional se encuentra organizado en una jerarquía multinivel altamente redundante, compuesta por Local Loops, Troncales y Oficinas de Conmutación.

## Red telefónica

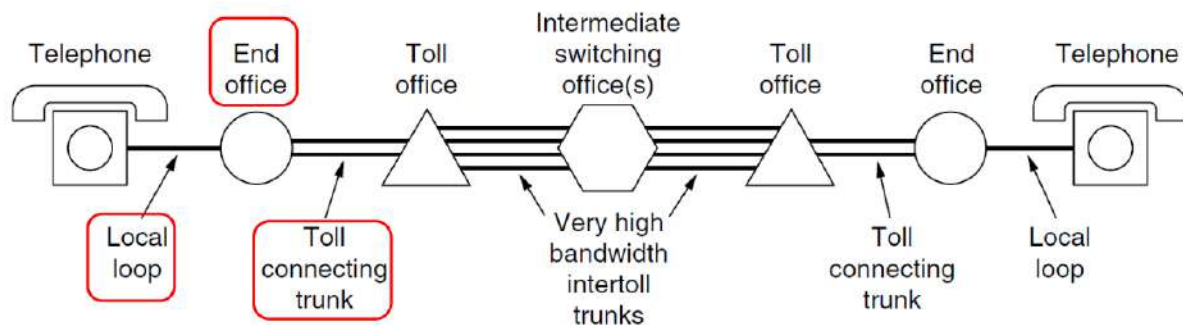
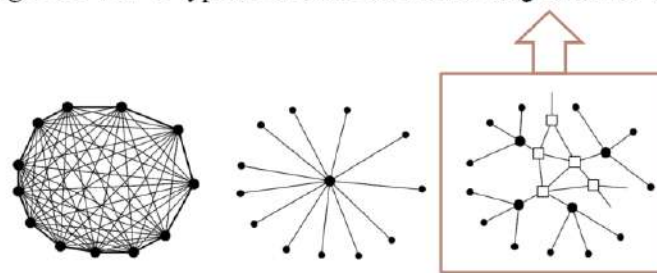
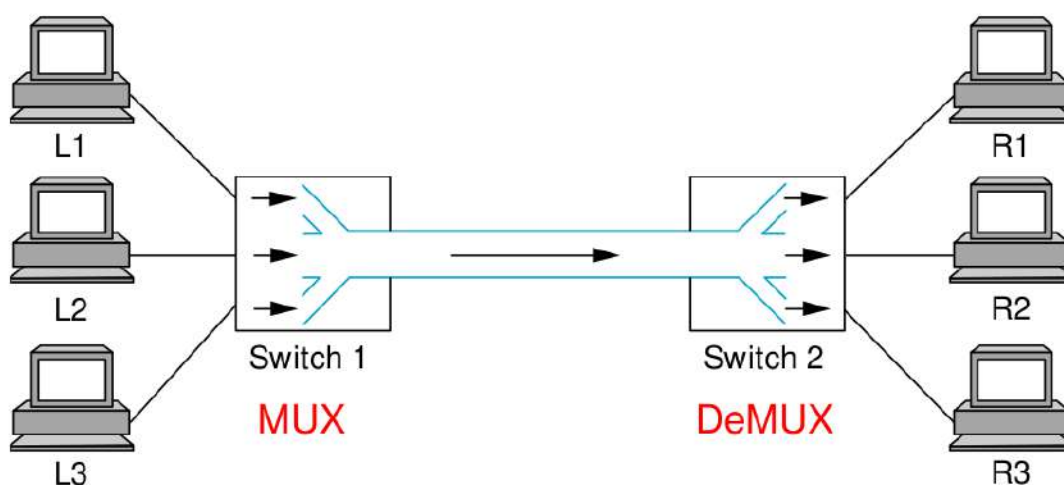


Figure 2-30. A typical circuit route for a long-distance call.

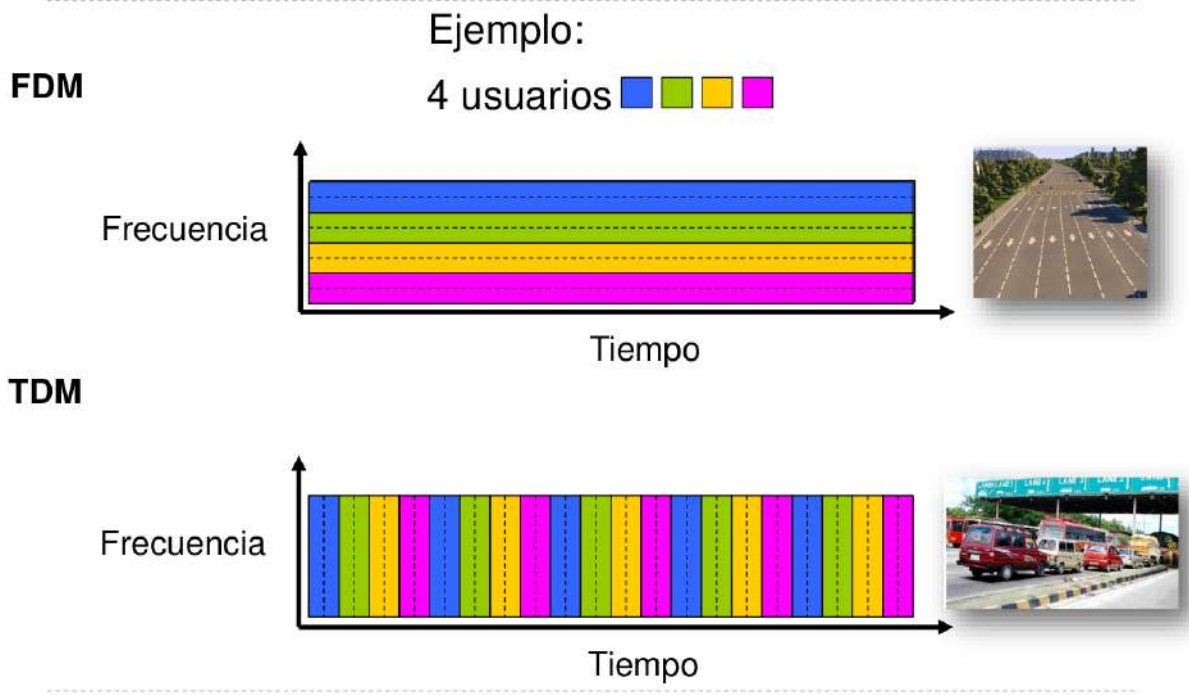


Las compañías telefónicas, por cuestiones de eficiencia, han desarrollado políticas elaboradas para multiplexar varios canales de baja capacidad, que utilizan los usuarios del servicio telefónico, sobre un único troncal físico de alta capacidad, para luego se demultiplexa para volver a la capacidad del receptor.



Para multiplexar las señales en un canal troncal, se utilizan principalmente dos técnicas: **TDM** (Time Division Multiplexing) y **FDM** (Frequency Division Multiplexing). En **TDM**, los

usuarios toman turnos en round robin (por turnos circulares), obteniendo periódicamente cada uno de los usuarios el ancho de banda **completo** por un período de tiempo **acotado**. En cambio, en **FDM** el espectro de frecuencias es subdividido en canales de ancho de banda **acotado**, que es usado a **tiempo completo** y exclusivo por cada usuario. Ambas técnicas pueden utilizarse en combinación.



Por ejemplo, en el caso de la radio AM, tenemos un espectro reservado de 500-1500 kHz, donde cada emisora de radio reserva diferentes porciones del espectro (FDM). Además, cada estación tiene dos subcanales lógicos: música y avisos comerciales, que se alternan en la misma frecuencia de radio (TDM).

FDM requiere de circuitería analógica no trivial, mientras que TDM puede ser manejado enteramente por electrónica digital. También notemos que TDM solo puede ser utilizado para datos digitales, por lo que es necesario realizar una conversión analógico/digital. En particular, en la telefonía se digitalizan múltiples señales de voz analógicas y se combinan sobre un único troncal digital. (En [Conversión Digital-Analógico](#) se muestra cómo se resuelve este problema).

En la Fig., podemos ver una forma de organizar las distintas maneras con las que podemos tratar con el transporte de la información. Podemos ver que FDM y TDM son formas particulares de conmutación de circuitos, ya que se trata al canal de comunicación como un continuo (los mensajes no se subdividen en paquetes que viajan de forma independiente).

El otro gran paradigma, que inventó Kleinrock, es el de conmutación de paquetes. Dentro de este paradigma, tenemos las redes basadas en circuitos virtuales, y por otro lado las redes basadas en datagramas (IP). La idea en la conmutación de paquetes es que los recursos se utilizan bajo demanda. Todos los recursos están disponibles todo el tiempo a todo el mundo,

y se lo queda quien llegue primero, por lo que se suele decir que hay una división del tiempo bajo demanda.

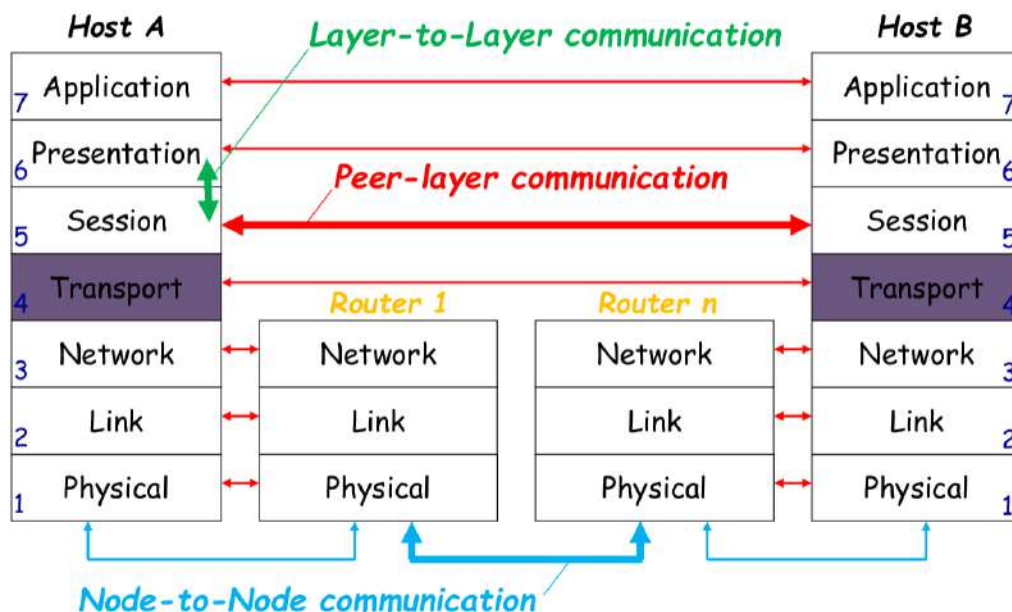
Los paquetes de distintas fuentes comparten el enlace, y lo utilizan en tiempos distintos. Para ello, los paquetes que compiten por el enlace, cuando este está ocupado, se encolan en buffers, esperando a que el enlace se libere. Cuando los buffers de la red se saturan, decimos que hay **congestión** (de esto se encarga la capa de transporte).

## Taxonomía de la redes



## Arquitectura de Redes

En los 80's, coexistían múltiples redes globales (BITNET, XEROX, DECNET, etc.), y se llegó a la conclusión de que era necesario ir hacia un estándar unificado. En 1983, se publica el ISO 7498, en el que se define el modelo OSI (Open Systems Interconnection).

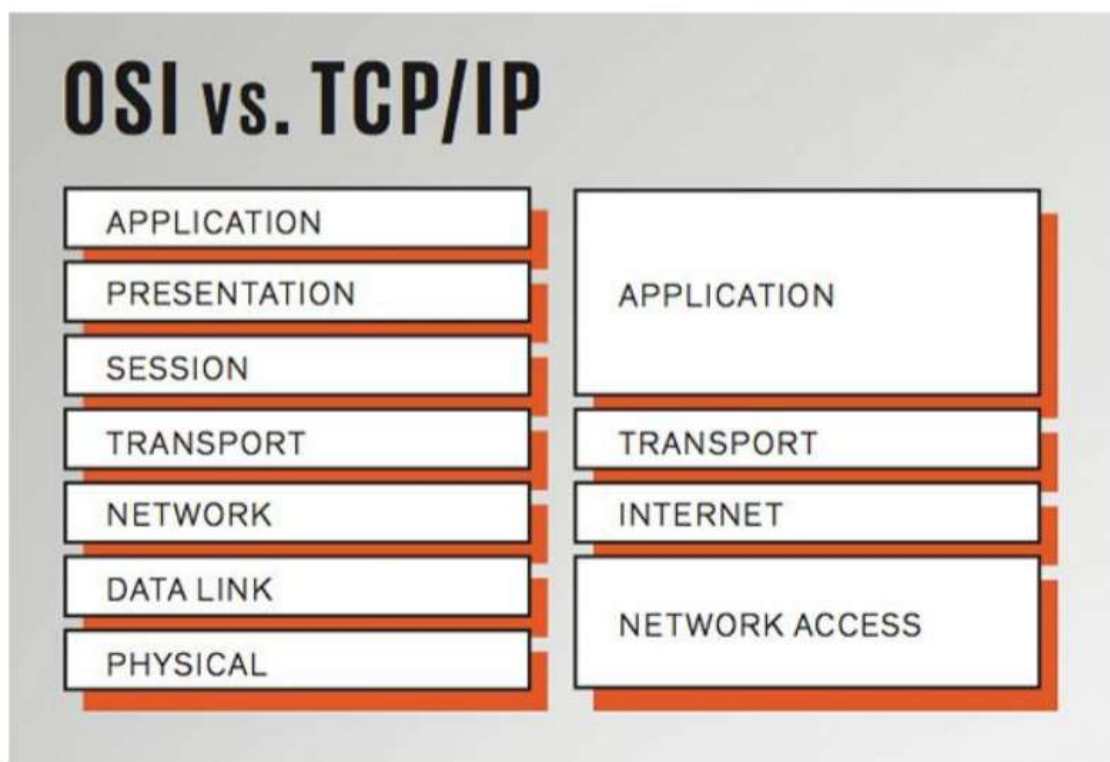


La idea elemental es conectar a un host A a un host B. Lo más importante es la subdivisión en capas, que subdivide responsabilidades. El mensaje que queremos transportar lo tiene la aplicación, y sabemos que el mensaje de alguna manera tiene que llegar al router y viajar

por los cables de red. Lo que pasa en el medio de la aplicación de una computadora hasta que llegan señales eléctricas a ese nivel se tienen todas esas capas.

Tenemos tres tipos básicos de comunicación en este modelo. La primera de ellas son las comunicaciones capa a capa, cómo una capa superior le delega información a una capa inferior, y viceversa. La segunda es la peer-layer communication (o end-to-end), en la que capas le entregan información a su capa de abajo, pero que su mensaje es para que sea interpretado por su homóloga en el host destino (la capa de presentación del host A le habla a la capa de presentación del host B). La capa de Transporte es la última que es leída solo por el host destino, las tres capas inferiores le van a hablar al nodo inmediato siguiente en el camino que conecta al host A con el host B. De este último tipo de comunicación, se encargan los routers, en los que no subimos hasta la última capa, porque lo único que hacemos es un pasamanos de información.

Este modelo no se impuso tal cual, sino que lo que se usa hoy en día es el modelo TCP/IP, donde las tres capas superiores se colapsan en la de aplicación. También se colapsaron las dos capas inferiores, la DATA LINK, que se encarga de la que define los bits que se van a inyectar al medio FÍSICO en sí mismo, en la capa de ACCESO A LA RED.



### Señales

En la Fig. podemos ver la conceptualización elemental que hizo Shannon de un sistema de comunicación.

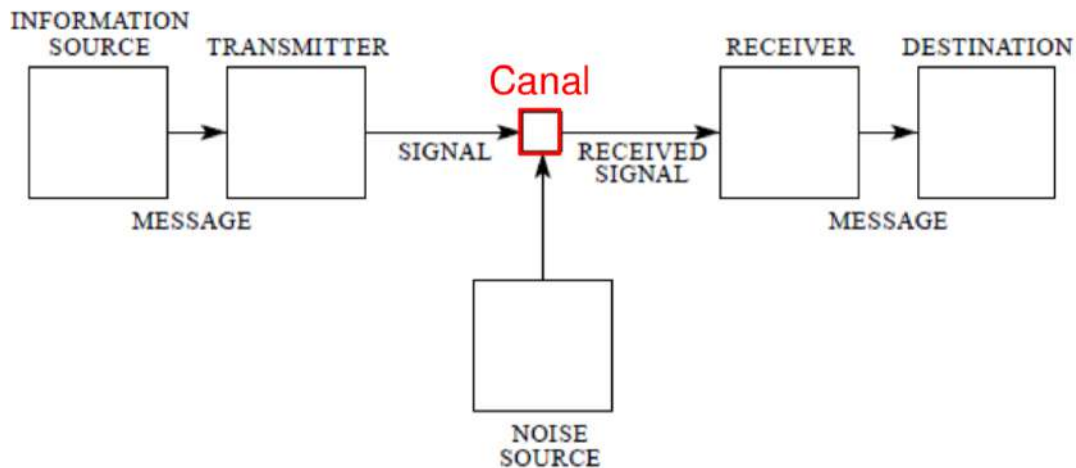
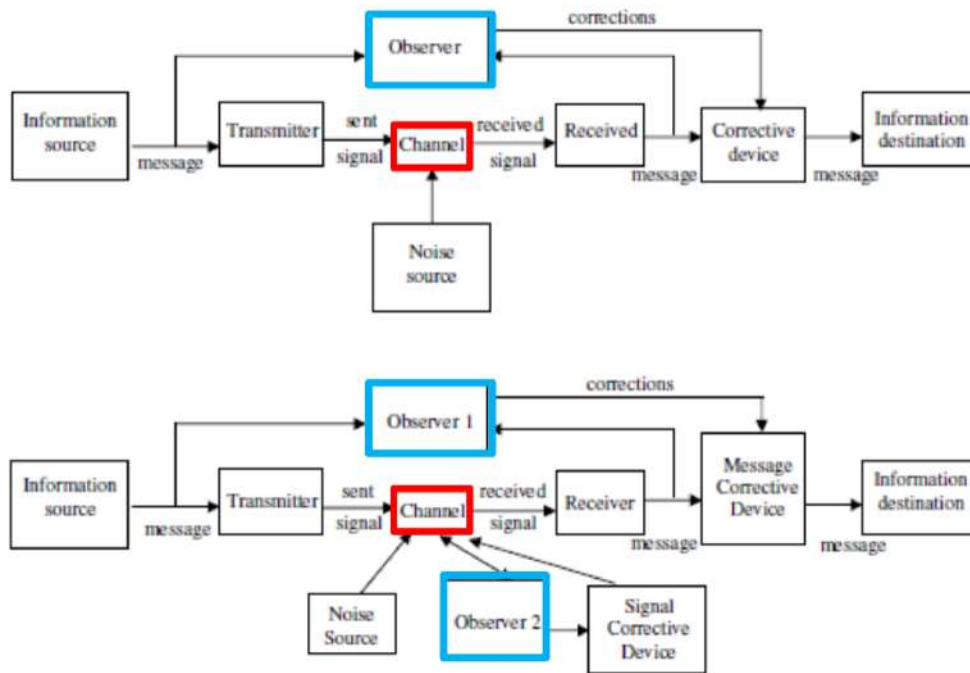


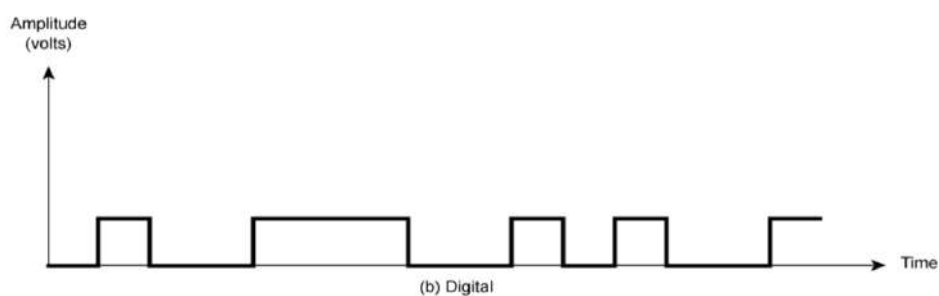
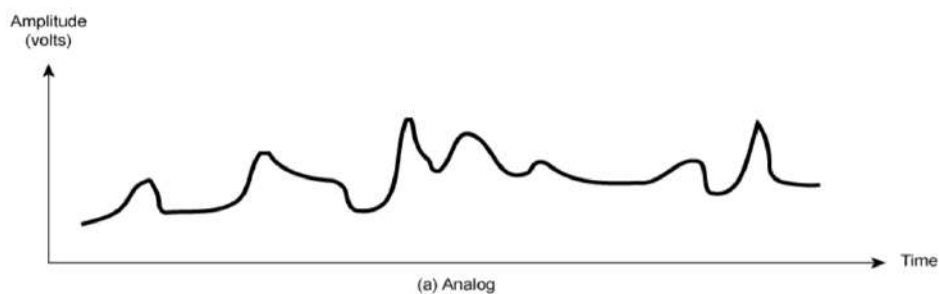
Fig. 1— Schematic diagram of a general communication system.

Tenemos una Fuente de Información que produce un mensaje, el cual se entrega a un transmisor, el cual produce señales que tienen que tener alguna relación con el mensaje (si todo sale bien), y con la información que quiso transmitir la fuente. Esta señal se va a ver enfrentada a un Canal, que no es otra cosa que una reducción conceptual de todo lo que hay en el medio entre un transmisor y un receptor. Luego, tenemos la señal recibida, el receptor, el mensaje que entendió el receptor a partir de esa señal recibida, y el destinatario que, con suerte, podrá deducir la misma información que envió la fuente. En el mundo real, no es posible realizar una transmisión carente de todo ruido, por lo que siempre vamos a tener algo de ruido.

Se puede sofisticar este modelo agregando nuevas capas de actores que trabajan para reducir los efectos nocivos del ruido. Por ejemplo, podemos agregar al modelo observadores externos que sean capaces de ver lo que se transmite de un lado y se recibe del otro, deducir información a partir de las diferencias, y tener chance de enviarle correcciones al Elemento Corrector. También es posible tener dos niveles de observadores: uno que se maneja a nivel mensaje y otro que se maneja a nivel característica del canal propio.



Las señales, tanto analógicas como digitales, evolucionan en el tiempo. Las señales analógicas pueden tomar infinitos valores intermedios, mientras que las señales digitales solo pueden tomar una cantidad finita de valores (típicamente, 0 ó 1). Además, una señal digital debe tener una frecuencia limitada.



Resulta que las señales que transportan la información (los 1s y 0s), casi siempre, son señales que se transportan como ondas electromagnéticas, las cuales se propagan en el vacío con una velocidad finita ( $c = 3 \times 10^8$  m/s), oscila a una frecuencia  $f$  determinada, y tiene una longitud de onda  $\lambda = c/f$ . La onda electromagnética se propaga en un medio físico

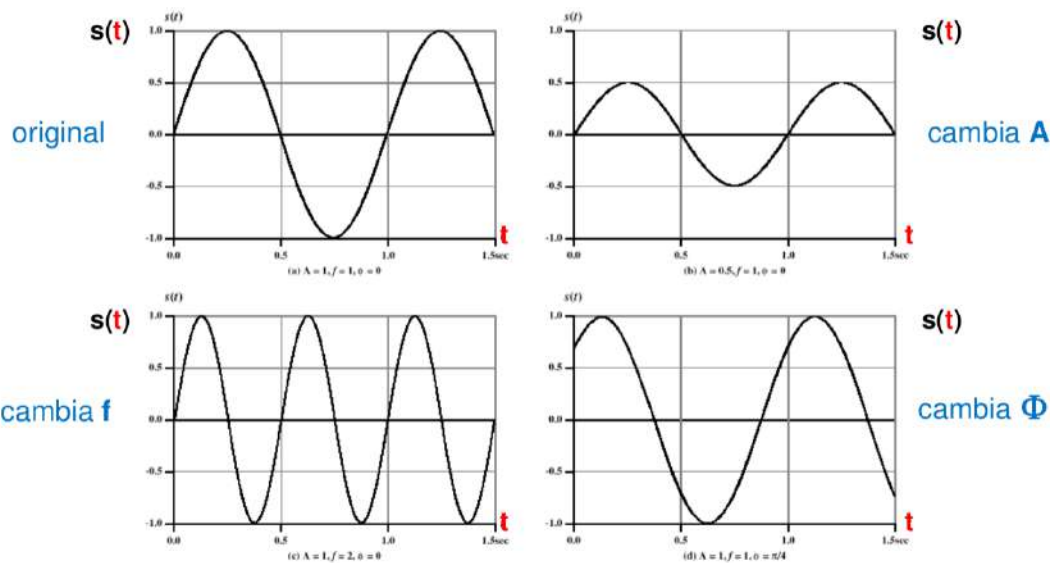


a una velocidad propia del medio. También sufre “pérdidas” o atenuaciones asociadas a imperfecciones del medio físico. Si se tienen muchas pérdidas, el mensaje no va a poder ser entendido del otro lado del canal.

Como todo se termina transmitiendo por ondas, nos van a establecer límites elementales acerca de lo que podemos esperar de un canal de comunicaciones basado (en cuanto a su velocidad para transportar información), por lo que es de interés estudiar las propiedades de las mismas. Típicamente, estas ondas se pueden modelar con funciones periódicas:

$$s(t) = A * \sin(2 \pi * f * t + \phi)$$

A: amplitud (Volts), f: frecuencia (Hz),  $\phi$ : fase (radianes).

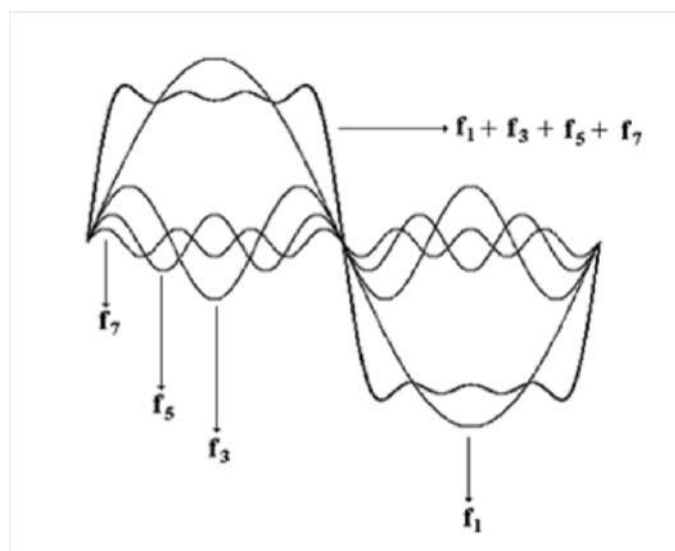


Podemos codificar 0s y 1s en base a estas propiedades. Por ejemplo, para amplitudes altas interpretamos 1, y para amplitudes bajas interpretamos 0.

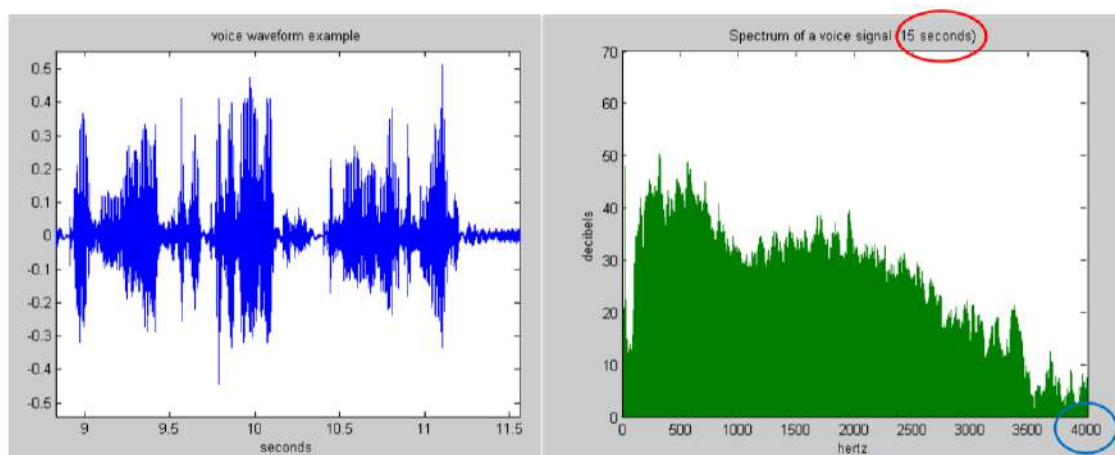
Hasta ahora, hemos representado las señales en el dominio del tiempo. Sin embargo, para comprender y simplificar la resolución del fenómeno de filtrado, es conveniente pasar al dominio de la frecuencia. Un canal filtra algunas frecuencias componentes de la señal.

Cualquier función periódica, realizable físicamente, puede ser representada a través de la serie infinita de senoides armónicamente relacionadas, conocida como serie de Fourier.



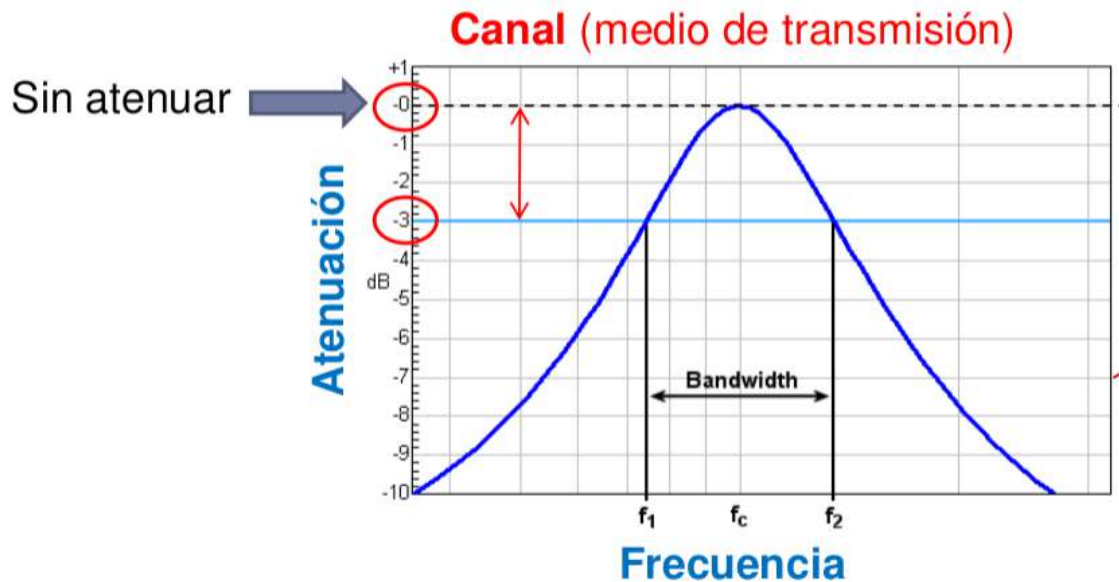


En la Fig. podemos ver una señal vocal. A la izquierda, la señal en función del tiempo (dominio del tiempo), y a la derecha vemos el espectro de frecuencias de la señal para 15 segundos de muestra (dominio de la frecuencia). Lo que nos estaría indicando el espectro de frecuencias es qué tan fuerte (medido en decibeles dB, una forma compacta de hablar de veces) son las distintas componentes de la señal.

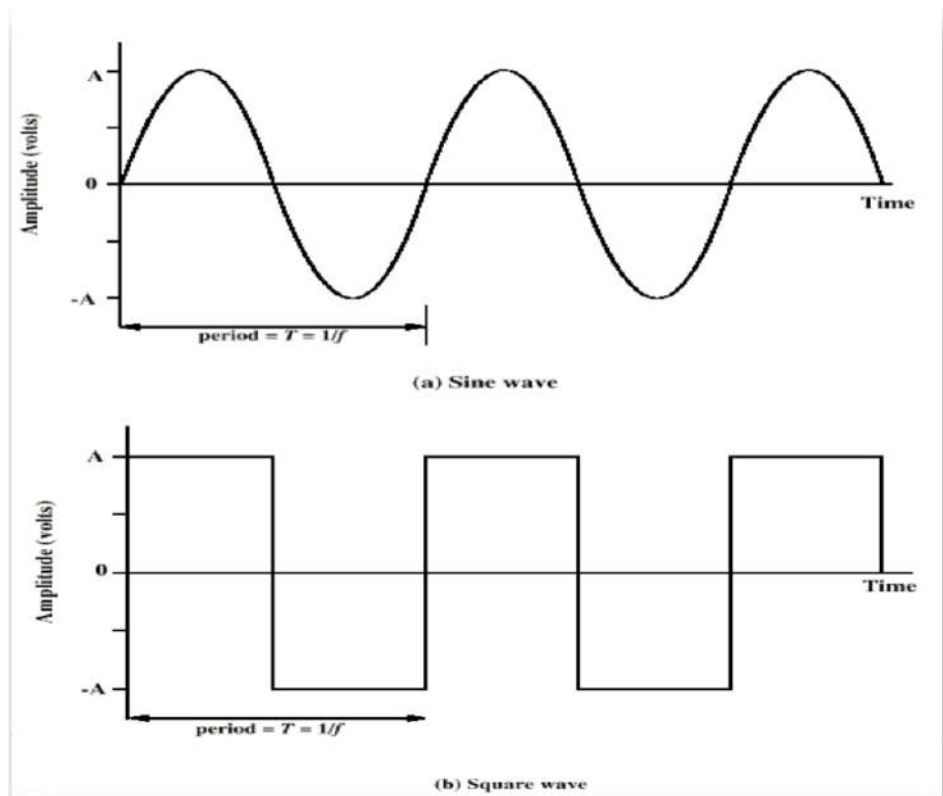


Volviendo al esquema de comunicación de Shannon, el canal actúa como filtro, y ese filtro afecta a la señal: lo que entra no es lo mismo que lo que sale. Específicamente, el canal atenúa distinto a las distintas frecuencias que atenúan a esas señales. En la Fig., vemos una característica de filtrado de un canal cualquiera. Podemos ver que para distintas frecuencias, el nivel de atenuación es distinto. En particular, vemos que para una frecuencia determinada, se alcanza un mínimo de atenuación. A estas frecuencias específicas, se las llama frecuencia central o típica, y depende directamente del canal. En el ejemplo, podemos ver que para la frecuencia central no hay atenuación, es decir, si ponemos una senoide con esa frecuencia entra y sale intacta. Por fuera de esa frecuencia, podemos ver que se empiezan a atenuar. Cuánto se atenúa y con qué forma lo hace, depende de las características físicas del canal. Por convención, se considera como el ancho de banda de un canal a esa parte central del espectro de frecuencias, tal que se atenúa menos de 3 dB.

Al límite inferior y al superior se las llama frecuencias de corte, y dependen de las características físicas del canal. En general, va a ser necesario ecualizar la señal para ajustarse al ancho de banda del canal, es decir, que la gran mayoría de las componentes de Fourier de la señal queden adentro del ancho de banda.



Notemos que una onda senoidal simple se puede describir con una única componente de la serie de Fourier, por lo que su espectro frecuencial es solo un palito. En cambio, en el otro extremo, la onda de mayor riqueza frecuencial es la onda cuadrada, porque estas bajadas abruptas que ocurren en las señales cuadradas son el cambio más abrupto más alto posible, y podemos pensar que un cambio más rápido indica mayor frecuencia. Esto nos estaría diciendo que no es una buena idea transmitir ondas cuadradas por medios físicos reales, salvo estemos dentro de los buses de una computadora, en donde tenemos atenuaciones muy bajas. Entonces, cuando trabajamos en telecomunicaciones, vamos a tener que codificar los 0s y 1s con ondas senoidales.



## Teoría de la Información

Ya vimos qué hacemos con respecto a la parte física del canal. Ahora vamos a ver qué le vamos a meter a ese generador de señales (transmisor), que va a meter la señal en el canal. Desarrollado a lo largo de los años de guerra, pero publicado en 1948, el documento de Shannon establece las bases para las comunicaciones digitales. Shannon argumentaba que todas las comunicaciones podían ser pensadas de la misma manera, ya fueran la radio, la televisión o el teléfono. Todos los mensajes, independientemente del canal, estaban potencialmente en riesgo de una entrega incorrecta debido al ruido. La clave para superar el ruido y, por lo tanto, asegurar la entrega confiable de mensajes era estudiar la información contenida en el mensaje.

Shannon propuso que el significado semántico de un mensaje era irrelevante para su transmisión, sino que debe ser concebido como una secuencia con propiedades estadísticas, las cuales las que podrían entender, estudiar y codificar para permitir una transmisión efectiva, es decir, que use la menor cantidad de recursos del canal para transmitir el mensaje (eliminar redundancia). Cuanto mayor es la entropía del mensaje, más esfuerzo se necesita para transmitirlo.

Shannon estableció la Teoría Clásica de la Información, que se basa en dos teoremas fundacionales:

1. Codificación para una fuente sin ruido.
2. Codificación para un canal ruidoso.

Ya estuvimos hablando del canal, ahora veamos la fuente. La teoría de Shannon no dice cómo implementar las codificaciones, pero brinda un límite teórico absoluto para la

transmisión de bits, basándose en la Ley de los Grandes Números (el promedio tiende a la esperanza).

**Definición:** Sea  $E$  un suceso que puede presentarse con probabilidad  $P(E)$ . Cuando  $E$  tiene lugar decimos que hemos recibido  $I(E) = -\log_2(P(E))$  bits. Si la probabilidad es 0, la información es infinita. Si la probabilidad es 1, la información es 0. Si la probabilidad es 0.5, la información será de 1 bit.

**Definición:** Una **fente de memoria nula** es una fuente que emite una secuencia de símbolos pertenecientes a un alfabeto finito y fijo, por ejemplo,  $S = \{1, 0\}$ . Los símbolos emitidos sucesivamente se eligen de acuerdo con una ley fija de probabilidad, donde la probabilidad de observar el próximo símbolo es independiente de los símbolos emitidos anteriormente. Es decir, para cada símbolo en el alfabeto, tenemos una probabilidad fija asociada. Entonces, podemos calcular la información que aporta cada símbolo a la fuente:

$$I(s_i) = -\log(P(s_i)).$$

**Definición:** Luego, podemos calcular la cantidad media de información por símbolo de una fuente, conocida como **entropía** de la fuente, de la siguiente manera:

$$H(S) = \sum_{s_i \in S} P(s_i) \cdot I(s_i).$$

En resumen, la información es del símbolo, mientras que la entropía es de la fuente (compuesta por su alfabeto de símbolos y sus probabilidades de aparición). Podemos interpretar a la entropía de la fuente como el valor medio ponderado de la cantidad de información del conjunto de mensajes posibles. También podemos decir que es una medida de la incertidumbre promedio, también llamado grado de incerteza, acerca de una variable aleatoria (si tenemos mucha entropía, los resultados que se obtienen son difíciles de predecir). También podemos pensar que es la cantidad de información obtenida al observar la aparición de cada nuevo símbolo (una fuente con alta entropía nos dice cosas más sorprendentes).

Notemos que la entropía es máxima cuando todos los valores posibles de la variable  $s$  son equiprobables, y se puede verificar que si hay  $n$  estados equiprobables, entonces

$$H(S) = H(S)_{\max} = \log_2(n)$$

En la Fig. podemos ver cómo evoluciona la entropía al variar la probabilidad de un símbolo en una fuente de información binaria (que tiene dos símbolos).

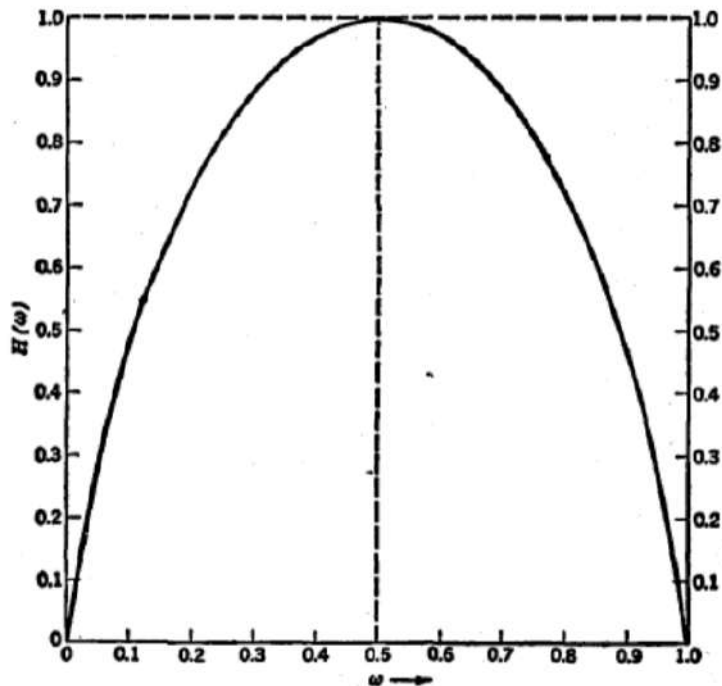


FIG. 2-3.  $H(\omega)$ , función entropía.

A partir de una fuente de memoria nula, podemos generar una **extensión** de la misma, a partir de interpretar cadenas de  $n$  símbolos originales como un nuevo símbolo. En general, si agrupamos de  $n$  símbolos, notamos a  $S^n$  como la extensión de  $n$ -ésimo orden de  $S$ . Se puede probar que  $H(S^n) = n \cdot H(S)$ .

Por ejemplo, si consideramos la extensión de segundo orden de la fuente  $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ , con  $P(s_1) = 0.5$ , y  $P(s_2) = P(s_3) = 0.25$ , la fuente  $S^2$  tendrá los nueve símbolos siguientes:

Símbolos de $S^2$ ... ..	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$	$\sigma_6$	$\sigma_7$	$\sigma_8$	$\sigma_9$
Secuencia correspondiente a los símbolos de $S$ ... ..	$s_1 s_1$	$s_1 s_2$	$s_1 s_3$	$s_2 s_1$	$s_2 s_2$	$s_2 s_3$	$s_3 s_1$	$s_3 s_2$	$s_3 s_3$
Probabilidad $P(\sigma_i)$ ... ..	1/4	1/8	1/8	1/8	1/16	1/16	1/8	1/16	1/16

$$\begin{aligned}
 H(S^2) &= \sum_{\sigma_i} P(\sigma_i) \log \frac{1}{P(\sigma_i)} \\
 &= 1/4 \log 4 + 4 \times 1/8 \log 8 + 4 \times 1/16 \log 16 \\
 &= 3 \text{ bits/símbolo}
 \end{aligned}$$

### Codificación

Por un lado teníamos la frecuencia, el ancho de banda, entre otras características físicas del canal. Por el otro, teníamos un emisor que emitía símbolos con determinada información, y con una entropía. Recordemos que no nos importa los significados de los símbolos, solo la información que nos aportan.

En la parte de Codificación en la Teoría de la Información, nos interesa saber cómo podemos transformar esos símbolos que nos vienen en secuencias de bits (códigos), que sean lo más eficiente posible, es decir, que utilicen la menor cantidad de bits posibles, eliminando redundancia.

Normalmente, una codificación debe ser de bloque, singular y separable (unívocamente decodificable).

Para que un código sea eficiente, vamos a tener que asignar palabras de código más cortas a los símbolos de la fuente más probables, porque al ser los más probables, es esperable que sean los que más aparecen en los mensajes.

Notación:

$L_i$ : Longitud de la palabra que codifica al símbolo  $s_i$  de la fuente.

$p_i$ : Probabilidad de aparición de  $s_i$ .

$r$ : Cantidad de símbolos diferentes del alfabeto del código.

$L = \sum p_i \cdot L_i$ : Longitud media de un código.

Notemos que  $L \cdot \log r \geq H(S)$ , porque sino vamos a tener pérdida de información. Esto no hace que el código sea eficiente, sino que lo que nos está diciendo es que necesitamos tener una determinada cantidad de códigos distintos para poder recuperar la información original del mensaje. En base a esto, podemos definir a la eficiencia del código como  $h = H(S) / (L \cdot \log r)$ , siendo  $h_{max} = 1$ .

Vamos a decir que un codificador es **óptimo** si codifica un mensaje  $X$  usando el menor número posible de bits. Para esto,  $L_i = -\log_2(P(x_i))$ , obteniendo que  $L = H(S)$ , y por tanto  $h = h_{max} = 1$ .

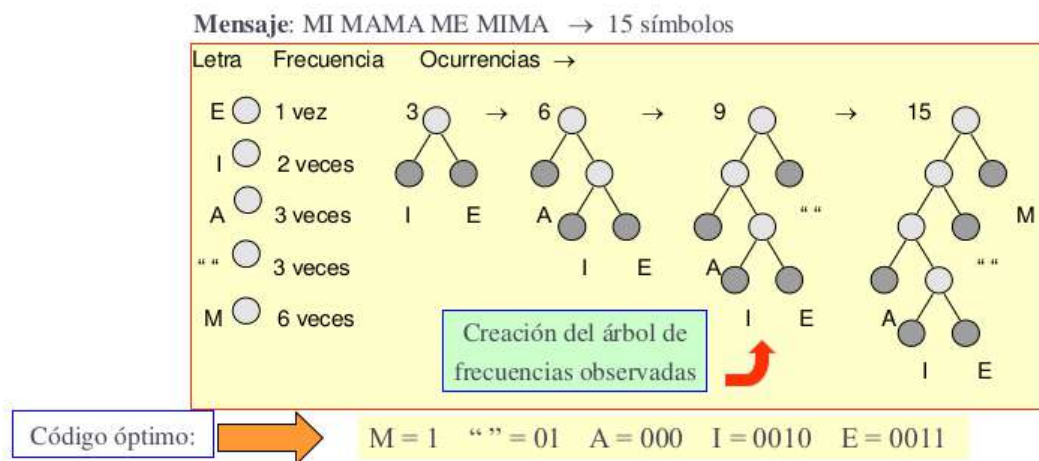
La condición necesaria y suficiente para que un código sea **instantáneo** es que sus palabras cumplan con la condición de los prefijos, es decir, que no exista palabra que sea prefijo de otra palabra de longitud mayor. La idea es que el receptor sea capaz de, una vez detectado un símbolo, no tenga que esperar a los siguientes bits para verificar si en realidad se trataba de un prefijo de otra palabra de longitud mayor.

La condición necesaria y suficiente para la **existencia** de un código instantáneo de longitudes  $l_1, l_2, \dots, l_q$  es que

$$\sum_{i=1}^q r^{-l_i} \leq 1$$

conocida como inecuación de Kraft.

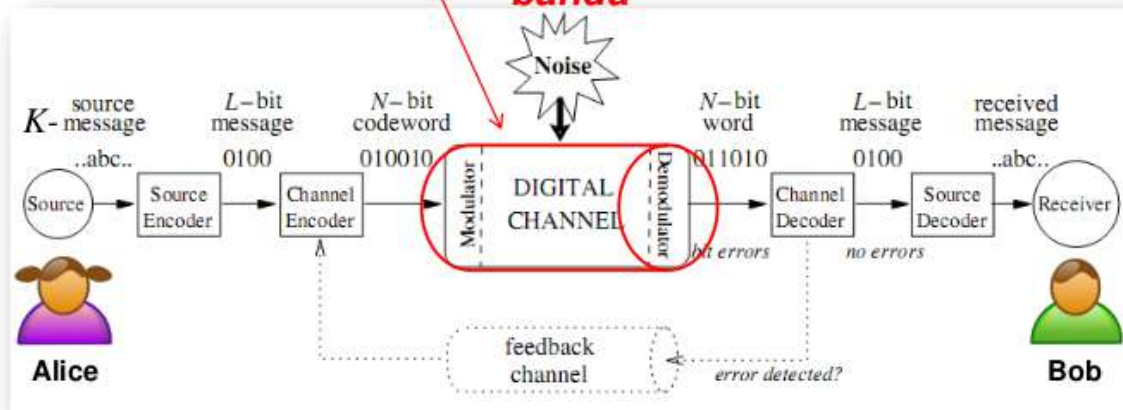
Existen heurísticas, como la Codificación de Huffman, que nos permiten obtener códigos instantáneos y óptimos. En la Fig., tenemos un mensaje de ejemplo con 15 símbolos. Primero, se cuenta la cantidad de veces que aparece cada símbolo, y nos armamos esos árboles. Podemos ver que se termina asignando los códigos más cortos a los símbolos que más veces aparecen.



### Sistema de Comunicaciones

En un sistema de comunicación, tenemos un canal (Digital Channel), el cual se ve afectado por un ruido. Tenemos un emisor y un receptor. A ese canal le inyectamos una secuencia de bits, generada a partir de una fuente que emite símbolos con cierta probabilidad mediante codificadores.

### **Sistema de Comunicación real:** **Canal sometido a *ruido*, *limitado* en *potencia* y en *ancho de banda***



La señal puede ser perturbada de muchas maneras. Si la señal es analógica, vamos a notar una degradación de la calidad de la señal. Si la señal es digital, vamos a tener errores de bits. Estas perturbaciones en la señal tienen muchas causas, entre ellas podemos destacar a la Atenuación y distorsión de atenuación, la Distorsión de retardo, y el Ruido.

**Atenuación y distorsión de atenuación:** Sabemos que la intensidad de la señal disminuye con la **distancia**, y cuánto se atenúa va a depender del medio. La intensidad de la señal recibida debe ser suficiente para que sea posible detectar a pesar de esta atenuación y debe ser suficientemente mayor que el ruido para que se reciba sin error. Normalmente, las



**frecuencias altas** (depende del medio) son las más afectadas por este fenómeno, por lo que se suele **ecualizar** la señal, es decir, amplificar más que el resto a las frecuencias más altas. No suele ser un problema demasiado grave en las señales digitales.

**Distorsión de retardo:** Solo ocurre en medios guiados, y se produce debido al hecho de que la velocidad de propagación en el medio varía con la frecuencia. Las componentes de frecuencia llegan al receptor en distintos instantes de tiempo, originando desplazamientos de fase entre las distintas frecuencias.

**Ruido:** El ruido son señales adicionales insertadas entre el transmisor y el receptor. Puede deberse a la **temperatura** absoluta del medio (en este caso particular se lo conoce como ruido térmico). También puede generarse un ruido por Intermodulación, que se producen por **falta de linealidad** en el canal, por Diafonía (una señal de una línea interfiere en otra), y por ruido Impulsivo (impulsos irregulares o picos).

En definitiva, estas perturbaciones hacen que el receptor tenga que deducir la señal original a partir de la señal recibida con ruido, pudiendo cometer errores (cuando tenía que leer un 1, lee un 0). A la tasa de errores por segundo, la llamamos BER (Bit Error Rate).

Notación:

**C:** Velocidad de transmisión de datos, en bits por segundo.

**B:** Ancho de Banda, en Hz.

**N:** nivel medio o potencia de ruido a través del canal.

**S:** Potencia de la señal. Lo podemos pensar como la Amplitud.

**SNR:** Relación Señal-a-Ruido.  $SNR = S / N$ .

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(SNR).$$

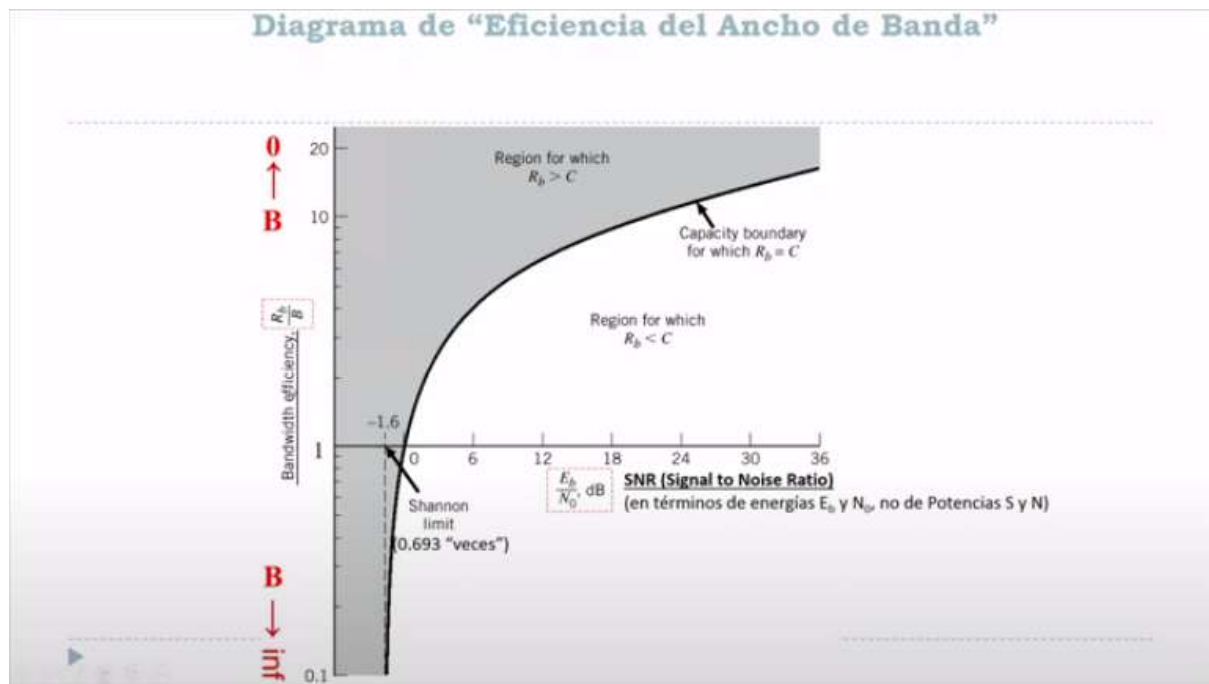
Para un cierto N, a mayor C, mejoramos en cuanto a que tenemos un menor período de un bit, pero empeoramos en cuanto a que tenemos una mayor tasa de error. En base a esto, Shannon identificó que era importante estudiar esta relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido **SNR** (Relación Señal-a-Ruido).

En principio, si se aumenta el ancho de banda B y la potencia de la señal S, aumenta la velocidad de transmisión C. Pero, al aumentar el ancho de banda B, aumenta el ruido, porque le estamos abriendo las puertas a más frecuencias con más ruido (no es lineal). Además, si aumentamos la potencia de la señal, aumenta las no linealidades, y por tanto el ruido de Intermodulación. En base a estas observaciones, Shannon define la velocidad de transmisión teórica máxima como:

$$C_{max} = B \cdot \log_2(1 + SNR)$$

Entonces, tenemos que la velocidad de transmisión depende del ancho de banda, que a su vez depende de las características físicas del canal, y la relación SNR, donde el ruido depende del canal, mientras que la potencia de la señal depende de la señal transmitida.

Por último, en la Fig. vemos un gráfico de la eficiencia del ancho de banda ( $R_b/B$ ), donde  $R_b$  es la tasa de bits que el sistema está inyectando, en función de la relación Señal-a-Ruido.



La eficiencia de ancho de banda nos estaría indicando cuántos bits por segundo vamos a inyectar por cada Hz de ancho de banda que tenemos. Si la eficiencia es alta, quiere decir que estamos metiendo muchos bits por segundo para un mismo ancho de banda. Recordemos que el ancho de banda en un medio físico es un recurso escaso. Vamos a querer usar el mínimo ancho de banda posible para transmitir la misma cantidad de información, y no podemos escapar del ruido.

Lo que estaría representando la curva es el límite de Shannon (cambiando unidades y demás). Estar exactamente en la curva corresponde al sistema ideal. Por encima de la curva, el sistema está condenado a tener una muy alta probabilidad de errores, sin posibilidad de recuperarse de dichos errores, sin importar la codificación utilizada. Por debajo de la curva, van a vivir las codificaciones utilizadas en la práctica, intentando acercarse lo más posible al límite de Shannon. En esta zona hay potencial para soportar transmisión libre de errores con probabilidad controlada y tan baja como se desee, agregando redundancia.

Por último, podemos ver que la función es asintótica, al no alcanzarse ese valor de -1.6, lo que nos estaría diciendo que no importa cuánto aumentemos el ancho de banda, no obtenemos mayor ganancia.

## Conversión Analógico - Digital

Volvemos al problema de transmitir voz por la red telefónica. Recordemos que lo que queríamos hacer era transformar la señal analógica de la voz a una señal digital para enviarla a través del troncal digital.

## CODEC

Recordemos que una señal analógica utiliza una magnitud con una variación continua, abarcando infinitos niveles posibles. En cambio, la señal digital emplea un número finito de valores discretos posibles, los cuales ya están predefinidos, por lo que al momento de realizar una conversión analógico-digital, debemos tener en cuenta esta diferencia.

Vimos que las señales periódicas se pueden descomponer como una sumatoria de componentes en senos y cosenos. El **Teorema de Muestreo (Nyquist)** nos dice que si a dichas señales sinusoidales las muestreamos, el caso más crítico de muestreo será aquella componente frecuencial de **mayor frecuencia**, por lo que si queremos reconstruir esa señal original debemos muestrearla con una frecuencia mayor a dos veces la componente frecuencial máxima. A esta frecuencia con la que debemos muestrear es llamada **frecuencia de muestreo** o de modulación. Otra posibilidad es analizar el contexto particular de uso, y en base a eso determinar una frecuencia de muestreo que logre capturar toda la información relevante.

Una vez se muestrea la señal analógica al doble del ancho de banda de la misma (PREGUNTAR), se obtiene un tren de pulsos de amplitud variable. Esta técnica se conoce como PAM. Luego, estos valores se cuantifican, aproximándolas mediante un número entero de **n** bits, apareciendo el error de cuantificación.

Una implementación particular de PAM son los canales PCM. En este tipo de canales, las señales analógicas son digitalizadas por un dispositivo llamado **CODEC**, produciendo símbolos de 8 bits por muestra (7 bits de datos y 1 de señalización). El CODEC toma 8000 muestras por segundo, debido a que toda la información relevante de un canal telefónico se puede capturar con 4 kHz de ancho de banda. Como se toman 8 mil muestras por segundo, y cada muestra son 8 bits, se puede decir que la tasa binaria necesaria para transmitir cada canal de voz es de 64 Kbps.

Si queremos multiplexar 24 canales PCM en un único troncal digital, lo que hacemos es recibir las 8 mil muestras de 8 bits de cada canal, y los agrupa en un único frame de  $24 * 8 + 1 = 193$  bits, para meter este frame en un canal de salida más rápido. En particular, ahora tenemos tasa agregada de  $193 \text{ bits} * 8000 \text{ muestras por seg} = 1.544 \text{ Mbps}$ . Este troncal digital se conoce como Portadora T1.

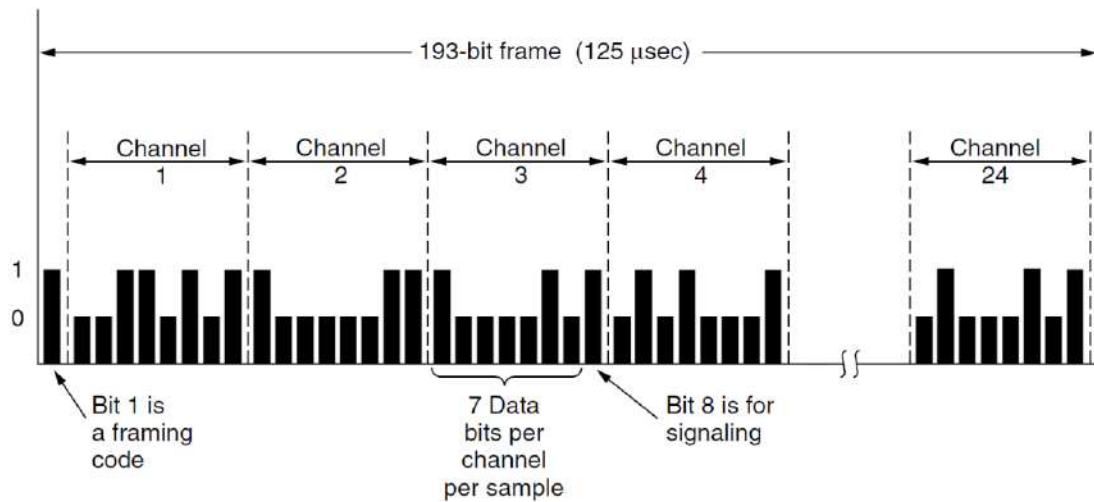


Figure 2-37. The T1 carrier (1.544 Mbps).

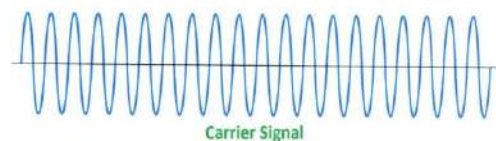
## MODEM

El Modem también convierte señales digitales a señales analógicas, y viceversa, pero no es lo mismo que un Codec. Lo que queremos hacer ahora es observar cierta característica de **una señal sin mensaje**, a la cual llamaremos la **portadora**, la cual vamos a asumir que existe y que podemos modificarla, según **una señal mensaje**, a la cual llamaremos **moduladora**.

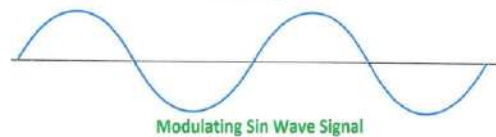
Moduladora Analógica / Portadora Analógica

## M. Analógica/P. Analógica

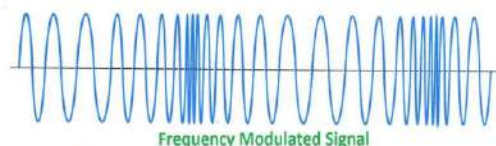
**Portadora**



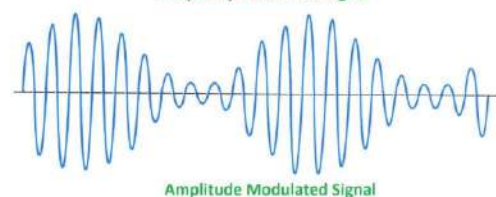
**Señal modulante**



Onda modulada en **frecuencia**



Onda modulada en **amplitud**



### Moduladora Digital / Portadora Analógica

La situación típica es la transmisión de datos digitales a través de la red de telefonía, es decir, una portadora analógica. Existen distintas técnicas de modulación, como por ejemplo el Desplazamiento de Amplitud (ASK), el Desplazamiento de Frecuencia (FSK), el Desplazamiento de Fase (PSK), y las Mixtas.

La **velocidad de modulación** se define como el número de cambios de señal por unidad de tiempo, y se expresa en baudios (símbolos por segundo). La **velocidad de transmisión** equivale a la velocidad de modulación multiplicado por el número de bits (N) representados por cada símbolo, expresada en bits por segundo:  $V_T = V_m N$

En lugar de codificar solo 0s y 1s en la señal, se puede utilizar de forma más eficiente el ancho de banda si cada elemento de la señal transmitida representa más de un bit, a partir de considerar  $2^N$  niveles de cada uno de los elementos de la señal. Por ejemplo, se puede aumentar el número de fases distintas y/o el número de amplitudes para cada fase. A este tipo de modulación, se la conoce como **modulación multinivel**.

$$S(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2\pi f_c t + 1/4 \pi) & 11 \\ A \cdot \cos(2\pi f_c t + 3/4 \pi) & 10 \\ A \cdot \cos(2\pi f_c t + 5/4 \pi) & 00 \\ A \cdot \cos(2\pi f_c t + 7/4 \pi) & 01 \end{cases}$$

### Moduladora Analógica / Portadora Digital

Vimos que el proceso de conversión de señales analógicas en digitales se conoce como **digitalización**, y los dispositivos que lo llevan a cabo son los CODECs. Ahora, lo que queremos hacer es ver cómo podemos modular una señal digital en una portadora digital. Algunos métodos de digitalización conocidos son Modulación por Impulsos Codificados (MIC o PCM), Modulación Delta (DM).

### Moduladora Digital / Portadora Digital

Los datos binarios se transmiten codificando cada bit de datos en cada elemento de señal. Tenemos varios métodos:

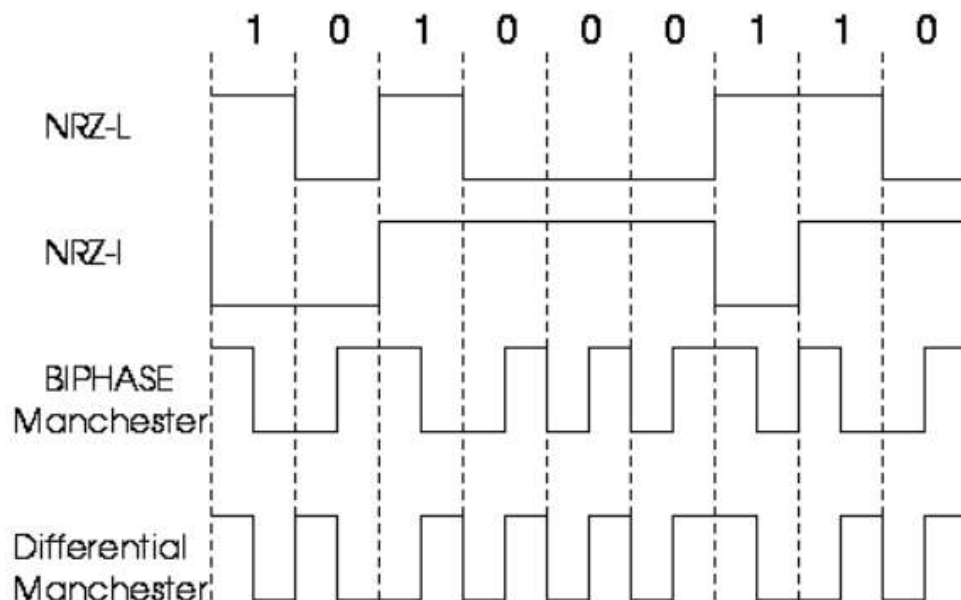
- NRZ (No retorno a cero) consiste en utilizar una tensión negativa para representar un 0 y una positiva para representar un 1. Tiene el inconveniente de que para

secuencias largas sin cambios se pierde el sincronismo (problemas de “clock recovery”).

- En NRZI (NRZ con inversión de unos), los datos se codifican mediante la presencia o ausencia de transición al principio del intervalo de un 1. Soluciona el problema de muchos 1s consecutivos, pero no el de muchos 0s consecutivos.
- En Manchester Bifase, se codifica mediante una transición en la mitad del intervalo de duración del bit: de bajo a alto representa un 1 y de alto a bajo un 0.
- En Manchester Diferencial, la codificación de un 0 se representa por la presencia de una transición al principio del intervalo del bit y un 1 mediante la ausencia de transición.

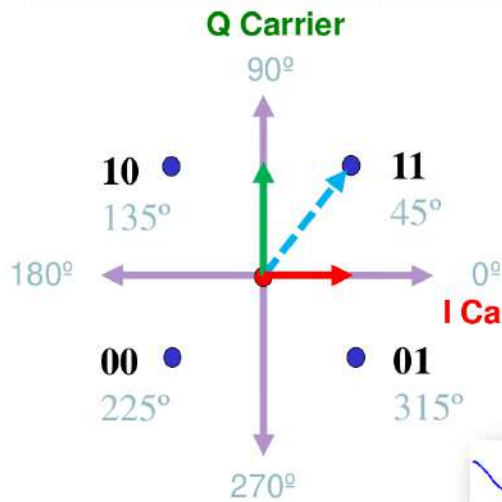
## Codificaciones

---



Por último, tenemos la modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation). La idea es agregar una segunda portadora: una que está en fase (I) y otra en cuadratura (desfasada en  $\pi/2$ ) (Q), y transmitimos la suma de las dos. Extiende la idea de modular una portadora a dos portadoras, y de esta manera aumentar la densidad de información transmitida (más bits por símbolo). Cuando usamos dos portadoras, la llamamos 4 QAM porque tenemos 4 bits. Luego, lo que podemos hacer es QAM multinivel, hasta 256 QAM. Obviamente, vamos a tener más problemas en la recuperación de errores al tener más valores entre los que distinguir.

## Vectores y Modulación: QAM



Una portadora I a 0°  
 Una portadora Q a 90°  
 El vector resultante tiene 45° y representa el símbolo 11.

Si necesito modular 01 =>  
 portadora I a 0°  
 portadora Q a 270°

### 4 QAM

(equivalente a QPSK: 2 bits/símbolo)

► 59

